



Nghiên cứu chế tạo và đánh giá tính chất hệ phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh của xi măng trám giếng nhằm ứng dụng trong khoan khai thác dầu khí

Study on the preparation and evaluation of additive systems for extending the thickening time of well cement for application in oil and gas drilling operations.

Nguyễn Trần Doanh^{1*}, Trần Việt Hoàng¹, Đào Quốc Tùy¹, Lê Mạnh Hùng²

¹ Khoa Kỹ thuật Hóa học, Trường Hóa và Khoa học Sự sống, Đại học Bách Khoa Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội, Việt Nam

² Tập đoàn Công nghiệp-Năng lượng Quốc gia Việt Nam

* Email: doanh.nt242255M@sis.hust.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 07/09/2025

Accepted: 11/10/2025

Published: 30/12/2025

Keywords:

Thickening time;

Additive;

oil and gas well;

cement slurry;

cement sheath.

ABSTRACT

The article investigates the relationship between the characteristic structure and application performance of a thickening-time retarding additive for cement slurries and cement stones used in oil well cementing. SEM images show a more uniform microstructure, while XRD indicates that the α -SiO₂ peak at $2\theta \approx 26.6^\circ$ remains clear, and the Ca₃SiO₅ peak appears with higher intensity, reflecting a retarded hydration process due to the additive. FT-IR spectra reveal absorption bands similar to commercial samples, with slight shifts. Particle size analysis shows a finer and more uniform system: D50 decreases from 25.259 μm to 17.101 μm , and the most frequent particle size decreases from 31.982 μm to 21.393 μm .

In terms of application, the additive prolongs the slurry thickening time to 6 hours 58 minutes at 0.10 gps, remaining stable under high temperature and pressure. Permeability is nearly unchanged, while porosity improves (21.023% vs. 22.604%). The maximum compressive stress increases, indicating better load-bearing capacity and stability, confirming the additive's practical effectiveness.

Giới thiệu chung

Trong khai thác dầu khí hiện nay, đặc biệt đối với các giếng có độ sâu lớn, áp suất và nhiệt độ cao, việc trám xi măng gặp nhiều thách thức. Quá trình bơm xi măng thường kéo dài, và trong nhiều trường hợp, xi măng có xu hướng đóng rắn sớm ngay trong quá trình bơm, trước khi lấp đầy hoàn toàn các khoảng trống cần thiết. Hiện tượng này dẫn đến nguy cơ tắc nghẽn thiết bị, trám không kín hoặc hình thành khe hở trong vách

giếng, ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn và chất lượng giếng khoan. Để kiểm soát quá trình này, việc sử dụng các phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh của xi măng là vô cùng quan trọng. Các phụ gia này giúp kéo giãn thời gian đóng rắn, cho phép thao tác bơm và trám được thực hiện hiệu quả hơn, đồng thời duy trì các tính chất cơ lý cần thiết của vữa xi măng sau khi đóng rắn. Phần lớn phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh đang được sử dụng chủ yếu là sản phẩm nhập khẩu, chi phí cao và chưa được tối ưu hóa cho các điều kiện giếng khoan tại Việt Nam. Trong khi đó, đặc tính địa chất, nhiệt độ, độ

mặn và thành phần nước trộn của các giếng khoan trong nước có sự khác biệt đáng kể. Điều này đòi hỏi cần nghiên cứu và tổng hợp các loại phụ gia phù hợp, điều chỉnh tính năng tại chỗ để đáp ứng nhu cầu thực tiễn, đồng thời giảm chi phí và tăng tính hiệu quả trong khai thác. Thành phần chính trong các phụ gia này thường là các hợp chất hữu cơ, có khả năng hấp phụ trên bề mặt hạt xi măng, ức chế quá trình hydrat hóa và kéo dài thời gian đặc quánh [1, 2]. Tuy nhiên, nhiều phân tử hữu cơ không ổn định ở nhiệt độ cao, thường trên 160–170°C. Khi bị phân hủy nhiệt, chúng mất khả năng kiểm soát tốc độ hydrat hóa, đồng thời có thể tạo ra các sản phẩm phụ không mong muốn như chất bột hoặc tạp chất, gây ảnh hưởng xấu đến tính chất cơ học của vữa sau khi đông rắn. Do đó, việc nghiên cứu phụ gia có khả năng hoạt động ổn định ở nhiệt độ cao và kiểm soát tốt quá trình đông rắn là một yêu cầu cấp thiết [3,4,5].

Công thức tính tổng thời gian đặc quánh (T_Q) [6]:

$$T_Q = T_{CM} + T_p + T_v + T_{PL} + T_{DT}, \text{ [phút]}$$

trong đó:

- T_{CM} : Thời gian khuấy trộn vữa với nước và phụ gia;
- T_p : Thời gian chuẩn bị (có thể gộp vào T_{CM});
- T_v : Thời gian bơm ép dung dịch khoan ra khoảng không vành xuyên;
- T_{PL} : Thời gian di chuyển nút bơm;
- T_{DT} : Thời gian dự trữ an toàn (30-60 phút).

Thời gian trộn vữa và phụ gia:

$$T_{CM} = \frac{V_{xm}}{v_{xm}}$$

trong đó:

- V_{xm} : Thể tích xi măng khô (1 bao)
- v_{xm} : Vận tốc trộn (bao/phút)

Thời gian bơm ép dung dịch khoan ra khoảng không vành xuyên:

$$T_v = \frac{V_{dd}}{v_v}$$

trong đó:

- V_{dd} : Thể tích chất lỏng để ép nút trên
- v_v : Vận tốc ép

Cũng có thể xác định thời gian trám ($T_{xi \text{ măng}}$) xi măng theo công thức:

$$T_{xi \text{ măng}} = \frac{V_d}{60 \times n_1 \times Q_{IV}} + \frac{V_{xm}}{n_2 \times Q_{IV}} + \frac{0,98 \times V_{cp}}{(n-1) \times Q_{III}} + \frac{0,02 \times V_{cp}}{Q_{III}} + 10$$

trong đó:

- V_d : Thể tích dung dịch đậm (m^3);
- V_{cp} : Thể tích dung dịch bơm ép (m^3);
- Q_{IV} : Lưu lượng bơm với vận tốc số IV (dm^3/s);
- Q_{III} : Lưu lượng bơm với vận tốc số III (dm^3/s);
- n : Số thiết bị bơm trám.

Ở nghiên cứu này sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia lên vi cấu trúc, phân bố kích thước hạt, thời gian đặc quánh, độ thấm, độ rỗng và độ bền cơ học giúp tối ưu

hóa hiệu quả sử dụng phụ gia trong điều kiện thực tế, nâng cao chất lượng trám giếng, giảm thiểu rủi ro trong khai thác dầu khí.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất, dụng cụ

Lignosulfonat, thành phần hữu cơ chính của phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh; Borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), thuộc nhóm muối borates, đóng vai trò vô cơ hỗ trợ kéo dài thời gian đặc quánh; và Phosphonate vô cơ, điển hình là ATMP (Amino Trimethylene Phosphonic Acid) hoặc các muối của nó, được sử dụng để cải thiện hiệu quả của phụ gia.

Các dụng cụ và thiết bị sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: cân phân tích (độ chính xác $\pm 0,0001$ g) Ohaus PR224/E; máy khuấy từ gia nhiệt IKA RCT basic; máy rung siêu âm Ultrasonic Cleaner Granbo; tủ sấy Memmert UF110; tủ hút Esco; cốc thủy tinh 250 mL và 100 mL Pyrex; nhiệt kế Hana.

Quy trình thực nghiệm

Bước 1: Pha hỗn hợp dung dịch Lignosulfonat + Nước và hỗn hợp Borax + Nước cho cả 5 mẫu phụ gia để tỷ lệ được đồng đều để đánh giá hơn, đối với dung dịch Borax có thể gia nhiệt 50 – 60°C để tan hoàn toàn. Trộn đều 2 hỗn hợp với nhau bằng máy khuấy từ, có thể gia nhiệt nếu cần;

Bước 2: Từ dung dịch đã pha ở trên, ta chia dung dịch làm 5 phần bằng nhau để tiến hành pha các mẫu phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh, ATMP và nước được trộn theo tỷ lệ phù hợp để cho vào hỗn hợp dung dịch Lignosulfonat + Borax sau khi đã chia, sử dụng máy khuấy từ.

Các mẫu phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh đều chứa 55% Lignosulfonat và 5% Borax. Hàm lượng ATMP và nước thay đổi theo từng mẫu: BK40 có 40% ATMP, không có nước; BK35 có 35% ATMP và 5% nước; BK30 có 30% ATMP và 10% nước; BK25 có 25% ATMP và 15% nước; còn BK20 có 20% ATMP và 20% nước.

Việc lựa chọn tỷ lệ 55% Lignosulfonat và 5% Borax trong công thức phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh cho vữa và đá xi măng trám giếng dầu khí được căn cứ trên các nghiên cứu khoa học. Theo Bassioni và Ali [7], hàm lượng Lignosulfonat từ 0,1% - 0,2% theo khối lượng xi măng cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc kéo dài thời gian đông kết mà không làm giảm đáng kể tính chất cơ lý của vữa sau khi đông kết. Li và cộng sự [8], việc sử dụng Borax làm phụ gia có hiệu quả trong việc kéo dài thời gian đông kết của xi măng, với liều lượng tối ưu từ 1% đến 5% trong phụ gia. Do đó, việc sử dụng 55%

Lignosulfonat và 5% Borax trong công thức phụ gia là hợp lý, nhằm tối ưu hóa hiệu quả kéo dài thời gian đặc quánh mà vẫn đảm bảo các tính chất cơ lý của vữa và đá xi măng trám giếng dầu khí.

Bước 3: Sau khi đã hoàn thành pha phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh, ta cần để phụ gia hydrat hóa trong tối thiểu 24 giờ.

Bước 4: Tiến hành pha vữa xi măng với phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh và khuấy đều hỗn hợp thu được và cho vào Máy rung Ultra Sonic Cleaner để hỗn hợp được đồng nhất hoàn toàn.

Các phương pháp nghiên cứu

Các phép đo được tiến hành nhằm đánh giá từ cấu trúc đặc trưng đến tính năng ứng dụng của phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh. SEM được sử dụng để quan sát vi cấu trúc và độ đồng đều bề mặt. XRD xác định thành phần khoáng và đánh giá quá trình thủy hóa xi măng. FT-IR khảo sát các nhóm chức hóa học và tương tác của phụ gia với xi măng. Phân bố cỡ hạt theo TCVN 10825:2015 đánh giá kích thước và đồng đều hạt. Thời gian đông kết và độ ổn định thể tích theo TCVN 6017:2015 kiểm soát quá trình đóng rắn, trong khi độ bền nén theo TCVN 6016:2015 đánh giá khả năng chịu lực. Độ rỗng, độ thấm và thời gian đặc quánh khảo sát tính ổn định và khả năng trám kín của vữa.

Kết quả và thảo luận

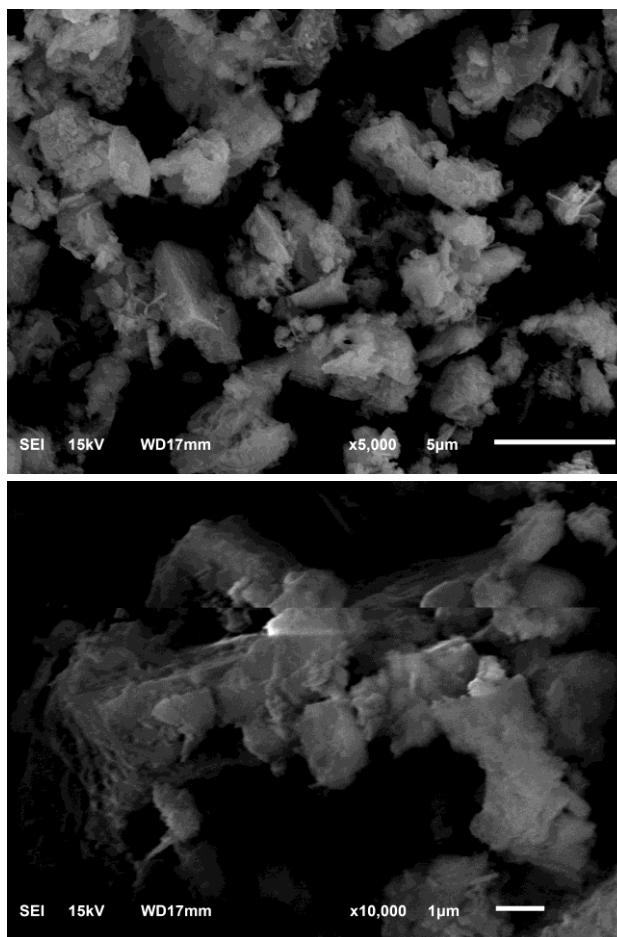
Bảng 1: Thời gian đông kết của các mẫu vữa xi măng

STT	Tên mẫu	Kết quả thời gian đông kết ở 65 ⁰ C		Tổng thời gian đông kết (phút)
		Bắt đầu (phút)	Kết thúc (phút)	
1	XM0	122	137	15
2	XM20	235	264	29
3	XM25	241	267	26
4	XM30	247	280	33
5	XM35	240	268	28
6	XM40	245	275	30

Có thể nhận thấy XM20, XM25, XM35 và XM40 đều có hiệu quả nhất định trong việc kéo dài thời gian đông kết. XM20 đạt 29 phút, XM25 là 26 phút, XM35 là 28 phút, và XM40 là 30 phút. Tuy nhiên, nổi bật nhất là XM30, với tổng thời gian đông kết đạt 33 phút, giá trị cao nhất trong toàn bộ dải khảo sát. Điều này cho thấy phụ gia BK30 không chỉ làm chậm thời gian bắt đầu

đông kết mà còn kéo dài toàn bộ quá trình chuyển từ trạng thái lỏng sang trạng thái rắn, giúp cửa sổ bơm trở nên an toàn và ổn định hơn đáng kể so với các mẫu còn lại. BK30 được đánh giá là mẫu phụ gia tiềm năng nhất để lựa chọn cho các nghiên cứu tiếp theo. Lý do là BK30 vừa đảm bảo sự kéo dài đáng kể thời gian đông kết, vừa duy trì độ ổn định và nằm hoàn toàn trong ngưỡng quy định của tiêu chuẩn kỹ thuật.

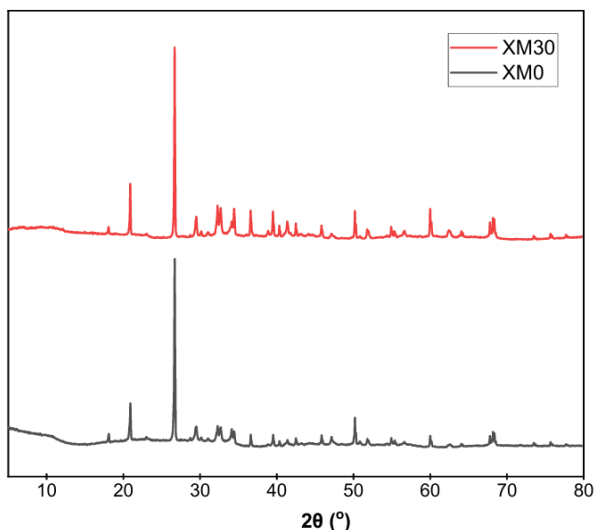
Với khả năng tạo ra cửa sổ bơm rộng hơn, BK30 đặc biệt thích hợp trong môi trường giếng khoan sâu và môi trường nhiệt độ cao, nơi yêu cầu thời gian thi công dài và độ tin cậy cao. Hơn nữa, việc lựa chọn BK30 làm đối tượng nghiên cứu tiếp theo cũng giúp định hướng phát triển các giải pháp phụ gia có tính cân bằng tốt giữa hiệu quả kéo dài thời gian đông kết và tính khả thi trong vận hành thực tế.



Hình 1: Ảnh chụp SEM ở các độ phóng đại khác nhau của mẫu đá xi măng có phụ gia BK30 (XM30)

Ảnh chụp SEM của mẫu đá xi măng có phụ gia BK30 (XM30) cho thấy cấu trúc vi mô khá xốp và không đồng nhất. Các sản phẩm thủy hóa xuất hiện rời rạc, liên kết chưa dày đặc và còn tồn tại nhiều khe rỗng, lỗ xốp trong khối vật liệu. Sự có mặt của phụ gia làm chậm quá trình thủy hóa, dẫn đến việc hình thành gel C-S-H diễn ra

chậm hơn, các tinh thể phát triển chưa hoàn thiện và phân bố không đồng đều. Bề mặt quan sát vẫn còn nhiều khoảng trống chưa được lấp đầy bởi sản phẩm thủy hóa, khiến mật độ cấu trúc thấp hơn so với mẫu xi măng thông thường. Điều này phản ánh đúng cơ chế tác dụng của phụ gia BK30 là kéo dài thời gian ninh kết, đồng thời làm chậm quá trình phát triển cấu trúc đặc chắc trong giai đoạn đầu.

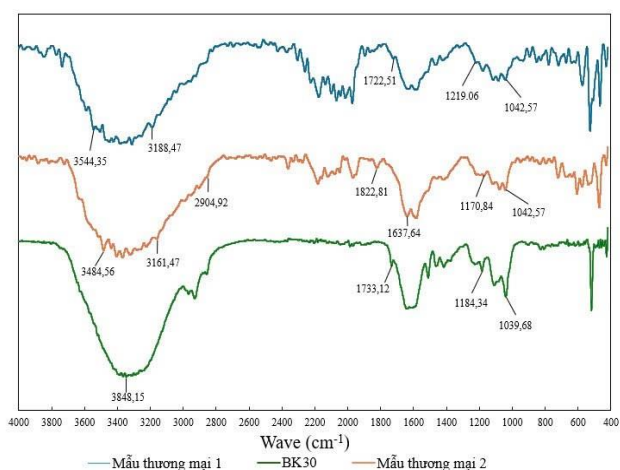


Hình 2: Giảm đồ XRD của mẫu XM0 và XM30

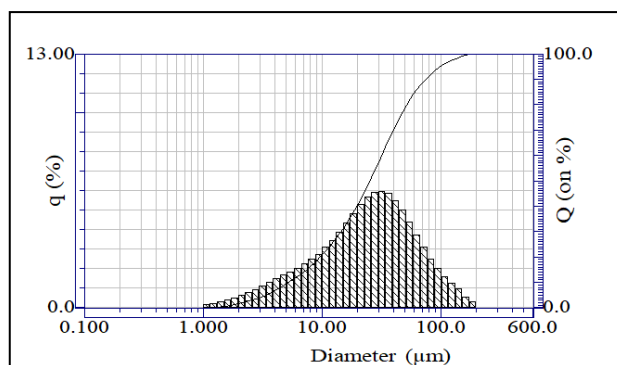
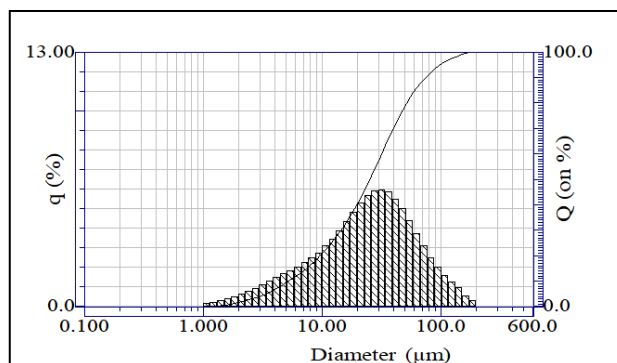
Phổ XRD cho thấy ở mẫu XM0 (không phụ gia), cường độ nhiễu xạ đặc trưng cho pha thạch anh (α - SiO_2) xuất hiện rõ rệt tại $2\theta \approx 26,6^\circ$, trong khi các đỉnh nhiễu xạ của pha alite (Ca_3SiO_5) tại $2\theta \approx 29,5^\circ, 32,2^\circ$ và $34,5^\circ$ có cường độ thấp. Điều này chứng tỏ quá trình thủy hóa diễn ra nhanh chóng, phần lớn C_3S đã chuyển hóa thành sản phẩm thủy hóa vô định hình C-S-H, vốn khó quan sát bằng XRD [9]. Như vậy, phản ứng thủy hóa ở mẫu XM0 diễn ra mạnh mẽ và không bị kìm hãm. Ngược lại, ở mẫu XM30 (có phụ gia), đỉnh thạch anh α - SiO_2 tại $2\theta \approx 26,6^\circ$ vẫn được ghi nhận, nhưng các đỉnh nhiễu xạ của alite (Ca_3SiO_5) xuất hiện với cường độ lớn hơn và không có sự dịch chuyển đáng kể. Kết quả này phản ánh quá trình thủy hóa đã bị kìm hãm rõ rệt, do lượng Ca_3SiO_5 chưa bị tiêu hao nhiều nhờ sự ức chế phản ứng của phụ gia, trong khi ở mẫu không phụ gia, các pha này đã nhanh chóng chuyển hóa thành sản phẩm thủy hóa vô định hình.

Kết quả phổ FT-IR Hình 3 cho thấy mẫu BK30 có nhiều đặc điểm phổ tương đồng với hai mẫu phụ gia thương mại. Các đỉnh hấp thụ đặc trưng của nhóm -OH quan sát thấy tại khoảng 3400 cm^{-1} , phản ánh sự hiện diện của lignosulfonat, thành phần hữu cơ chính có vai trò kéo dài thời gian đặc quánh của xi măng. Các dải dao động tại $2900\text{--}2950 \text{ cm}^{-1}$ liên quan đến liên kết C-H trong cấu trúc hữu cơ cũng được ghi nhận rõ rệt ở cả

ba mẫu. Ngoài ra, dải hấp thụ tại $1030\text{--}1045 \text{ cm}^{-1}$ có thể gán cho dao động kéo giãn S=O trong nhóm sulfonat của lignosulfonat. Sự xuất hiện của các đỉnh khoảng $1170\text{--}1190 \text{ cm}^{-1}$ và $1630\text{--}1640 \text{ cm}^{-1}$ cho thấy sự có mặt của các nhóm chức liên quan đến từ Borax, đóng vai trò muối vô cơ hỗ trợ làm chậm quá trình thủy hóa. Bên cạnh đó, phổ cũng thể hiện các tín hiệu tại vùng $1720\text{--}1730 \text{ cm}^{-1}$ đặc trưng cho dao động C=O, phù hợp với sự hiện diện của phosphonate vô cơ. Khi so sánh, có thể thấy BK30 thể hiện phổ FT-IR gần giống với các mẫu thương mại, cho thấy thành phần hóa học và nhóm chức chính tương tự.



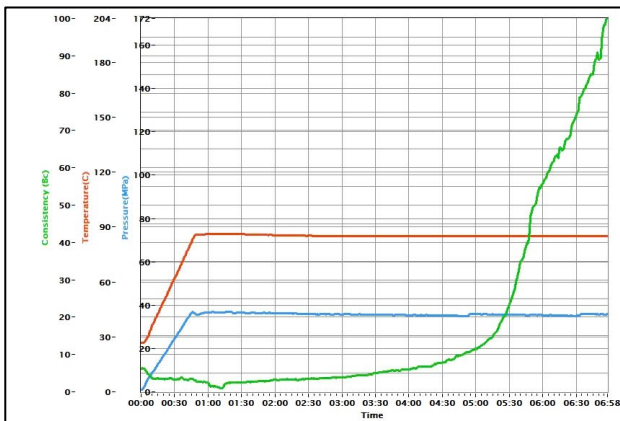
Hình 3: So sánh kết quả FT-IR của BK30 với 2 mẫu thương mại



Hình 4: Biểu đồ sự phân bố cỡ hạt của đá xi măng XM0 (ở trên) và XM30 (ở dưới)

Ở cùng điều kiện thí nghiệm, độ thấm của hai hệ gần như tương đương (vữa xi măng không phụ gia là 0,026 mD so với vữa xi măng có phụ gia BK30 là 0,028 mD), chênh lệch nhỏ và khó tạo khác biệt thực tiễn. Ngược lại, độ rỗng trung bình cho thấy xu hướng cải thiện rõ: mẫu có phụ gia BK-30 đạt 21,023%, thấp hơn mẫu không phụ gia (22,604%), phản ánh cấu trúc đặc chắc hơn.

Việc bổ sung phụ gia BK30 làm hệ hạt mịn và đồng đều hơn so với mẫu không phụ gia. Kích thước trung vị D50 giảm từ 25,259 μm (XM0) xuống 17,101 μm (XM30) (hình 4), tức giảm khoảng 32%. Kích thước chiếm tỷ lệ lớn nhất giảm từ 31,982 μm xuống 21,393 μm (giảm ~33%). Phần đuôi thô của phân bố cũng được cắt giảm mạnh: D90 từ 74,695 μm còn 33,313 μm và D95 từ 99,409 μm xuống 38,543 μm (giảm trên 60%). Đồng thời, D10 dịch chuyển từ 5,308 μm về 4,549 μm , cho thấy toàn bộ phân bố hạt được dịch chuyển về phía mịn hơn và hẹp hơn quanh trung tâm.



Hình 5: Thời gian đặc quánh của xi măng khi thêm phụ gia BK30 với hàm lượng 0.1 gps tại nhiệt độ 85°C, áp suất 35.6 Mpa

Dưới điều kiện thí nghiệm 85 °C và áp suất 35,6 MPa, kết quả đo cho thấy phụ gia BK30 với hàm lượng 0,1 gps đã phát huy hiệu quả rõ rệt trong việc kéo dài thời gian đặc quánh của vữa xi măng. Đường cong độ sệt duy trì ổn định ở mức thấp trong suốt giai đoạn đầu, đảm bảo vữa vẫn giữ trạng thái bơm được trong thời gian dài mà không xảy ra hiện tượng gel hóa sớm. Sau khoảng 5–6 giờ, độ sệt mới bắt đầu tăng dần nhưng vẫn trong giới hạn kiểm soát, cho thấy cửa sổ bơm đủ rộng và an toàn. Khi đạt đến thời điểm đặc quánh, độ sệt tăng vọt, thể hiện quá trình chuyển nhanh sang trạng thái đông kết, giúp xác định rõ ràng thời điểm kết thúc bơm trám. Đặc điểm “ổn định lâu – tăng nhanh” của đường cong chứng minh BK30 đã làm chậm quá trình thủy hóa một cách hiệu quả mà không gây cản trở cho quá trình phát triển cường độ ở giai đoạn sau. Hàm lượng 0,1 gps cũng được xem là hợp lý vì vừa đảm bảo kéo dài thời gian ninh kết,

vừa tránh nguy cơ chậm quá mức gây ảnh hưởng đến tiến độ thi công hoặc chất lượng vữa. Như vậy, có thể khẳng định 0,1 gps BK30 là nồng độ phù hợp để kéo dài thời gian đặc quánh của vữa xi măng trong điều kiện nhiệt độ và áp suất cao.

Kết luận

Đã chế tạo thành công và đánh giá thành công các mẫu phụ gia kéo dài thời gian đặc quánh cho xi măng trám giếng.

BK30 thể hiện ưu thế vượt trội với thời gian đặc quánh ổn định lên tới 6 giờ 58 phút. Về vi cấu trúc, BK30 giúp giảm độ rỗng (21,0% so với 22,6%) trong khi độ thấm gần như không thay đổi, chứng tỏ nền vật liệu đặc chắc hơn, phân bố cỡ hạt dịch về phía mịn và hẹp hơn. Kết quả FT-IR cho thấy BK30 có đặc điểm tương đồng với mẫu thương mại, trong khi XRD khẳng định không hình thành pha tinh thể mới, tác động chính nằm ở phần vô định hình. Hình ảnh SEM cho thấy mạng C–S–H liên tục, ít vi nứt và lỗ rỗng, góp phần nâng cao cơ tính và cải thiện khả năng cách ly vỉa.

Như vậy, BK30 là phụ gia tiềm năng, vừa kéo dài đáng kể thời gian đặc quánh, vừa cải thiện vi cấu trúc và cơ lý của đá xi măng, đáp ứng tốt yêu cầu thi công bơm trám giếng trong điều kiện thực tế.

Tài liệu tham khảo

1. F.L. Sabins, Cementing (SPE Textbook Series, Vol. 4). Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1990.
2. M. Bai, J. Wu, X. Liu, et al., J. Pet. Sci. Eng., 182 (2019) 106249. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106249>
3. K.M. Ravi, G. Gasem, SPE Drill. Complet., 17(2) (2002) 91–96. <https://doi.org/10.2118/74404-PA>
4. E.B. Nelson, D. Guillot, Well Cementing (2nd ed.). Houston, TX: Schlumberger, 2006.
5. M.C.G. Juenger, F. Winnefeld, J.L. Provis, J.H. Ideker, Cem. Concr. Res., 41(12) (2011) 1232–1243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>
6. H. Rabia, Oilwell Drilling Engineering: Principles and Practice. London: Graham & Trotman, 1986.
7. G. Bassioni, M.M. Ali, Adv. Cem. Res., 25(5) (2013) 245–253. <https://doi.org/10.1680/adcr.12.00016>
8. P. Li, D. Chen, Z. Jia, Y. Li, S. Li, B. Yu, Materials, 16(8) (2023) 3010. <https://doi.org/10.3390/ma16083010>
9. K.L. Scrivener, A. Nonat, Cem. Concr. Res., 41(7) (2011) 651–665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>